

La modelización numérica de la dispersión de productos de desecho vertidos desde explotaciones de acuicultura: una herramienta para la adecuada gestión medioambiental del sector

M. González, P. Gyssels, J. Mader, Á. Borja, I. Galparsoro y A. Uriarte

Fundación AZTI. Herrera Kaia. Portualdea, s/n. E-20110 Pasaia (Guipúzcoa), España. Correo electrónico: mgonzalez@pas.azti.es

Recibido en julio de 2001. Aceptado en febrero de 2002.

RESUMEN

Esta comunicación presenta algunos de los resultados obtenidos por AZTI en la aplicación de códigos en elementos finitos para el estudio numérico de las plumas de afección producidas por los vertidos de desechos de jaulas de acuicultura.

Los modelos numéricos de simulación de la realidad física permiten una aproximación novedosa al estudio de los impactos causados por las explotaciones de piscicultura, facilitando el análisis de las alternativas de ubicación y optimizando los recursos necesarios para los planes de vigilancia de las explotaciones. Sin embargo, el modelo numérico no es más que un complemento de las medidas de campo que permiten su calibración y de las que depende su fiabilidad. Todo ello debe ser puesto en manos expertas que permitan la adecuada gestión del sector acuicultor.

Palabras clave: Dispersión, desechos, modelización, elementos finitos, calibración.

ABSTRACT

Numerical modelling of the dispersion of waste products from aquaculture installations: A tool for appropriate environmental management of the sector

The present paper deals with some of the results obtained by AZTI from the application of finite element codes for the numerical study of plumes produced by waste spills from aquaculture stations.

The use of numerical models to simulate physical reality represents a new approach to studying the impact of fish farming, facilitating the analysis of site selection and optimising the necessary resources for operative monitoring plans. Nevertheless, the numerical model can only serve as a complement to in situ measurements, without which the models cannot be properly calibrated, nor their reliability verified. All these data must be put into expert hands for the sake of sustainable management of the aquaculture sector.

Keywords: Dispersion, waste, numerical models, finite elements, calibration.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo actual de las plataformas computacionales y el incremento de su potencia de cálculo han permitido afrontar desde una perspectiva nue-

va la resolución de complicados problemas hidrodinámicos y de dispersión en el medio marino.

La extensión de cualquier vertido al mar depende de las características de la sustancia vertida y de las corrientes marinas existentes. Por ello, la reali-

zación de una simulación numérica de la dispersión de partículas procedentes de las jaulas de piscicultura precisa de la modelización de las corrientes marinas en la zona de estudio.

El objetivo final de los modelos numéricos es reproducir y prever el comportamiento de la naturaleza, para ello se hace necesario conocer por un lado las ecuaciones que rigen los procesos y, por otro, disponer de las herramientas numéricas y de cálculo necesarias para resolver estas ecuaciones de comportamiento con suficiente aproximación a los efectos que nos interesan.

Por último, y como punto más importante, no es suficiente con disponer de un modelo numérico de resolución de un complejo sistema de ecuaciones sin validarlo mediante la comparación con las soluciones analíticas y exactas de problemas simplificados, y sin calibrar los coeficientes libres que aparecen en las formulaciones empleadas con medidas de campo específicas y reales.

Las ecuaciones más generales que se pueden utilizar para la resolución de problemas hidrodinámicos y de dispersión en el medio marino son las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación general de convección - difusión. Los algoritmos utilizados para la resolución de estos sistemas de ecuaciones diferenciales utilizan la técnica de los elementos finitos mediante una aproximación *quasi-3D* para la variabilidad vertical, tanto de velocidades y concentraciones como de campos de densidad.

MATERIAL Y MÉTODOS

AZTI (Instituto Tecnológico y Pesquero del País Vasco), en colaboración con el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña, desarrolló el paquete de programas Trimodena®, que permite el estudio de la hidrodinámica marina y de la dispersión de sustancias en el mar.

Trimodena® permite afrontar la resolución de las ecuaciones de aguas someras tridimensionales mediante una aproximación en elementos finitos. Para ello tiene en cuenta la mayor parte de los términos generadores de corrientes en el mar: el viento, el equilibrio geostrófico entre la rotación terrestre y los gradientes de salinidad y temperatura, la rotura del oleaje (Espino, 1994) y la marea astronómica (González, 1994).

Las ecuaciones que resuelven estos modelos son las siguientes:

Ecuación de continuidad

$$\partial_t \eta + \partial_x [(\eta + h)U] + \partial_y [(\eta + h)V] = 0 \quad [1]$$

Ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento

$$\begin{aligned} \partial_t u + u \partial_x u + v \partial_y u - f v = & -g \frac{\rho_0}{\rho} \partial_x \eta - g \frac{1}{\rho} \partial_x \alpha \\ & + \partial_x [2K_H (\partial_x u)] + \partial_y [K_H (\partial_x v + \partial_y u)] + \partial_z [K_z (\partial_z u)] \end{aligned} \quad [2]$$

$$\begin{aligned} \partial_t v + u \partial_x v + v \partial_y v + f u = & -g \frac{\rho_0}{\rho} \partial_y \eta - g \frac{1}{\rho} \partial_y \alpha \\ & + \partial_x [K_H (\partial_x v + \partial_y u)] + \partial_y [2K_H (\partial_x v)] + \partial_z [K_z (\partial_z v)] \end{aligned} \quad [3]$$

donde η es la altura de la superficie libre sobre el fondo, u , v son las componentes horizontales del vector velocidad, U , V son las componentes horizontales del vector velocidad de la corriente verticalmente integrado, h es la profundidad, f es el parámetro de Coriolis, ρ es la densidad, g es la aceleración de la gravedad, K_H y K_z son los coeficientes de difusión turbulenta horizontal y vertical respectivamente y a es la integral de ρ entre 0 y z .

Las hipótesis para la obtención de las ecuaciones de aguas someras a partir de las ecuaciones primitivas de Navier-Stokes parten de suponer que el efecto de los términos en los que aparece la componente vertical de la velocidad es despreciable y que la presión es hidrostática. De este modo, en la formulación desaparece la incógnita velocidad vertical de la corriente, pero existe variación con la profundidad de las componentes u y v de la velocidad.

El problema hidrodinámico se afronta en dos fases: por un lado la aportación de los gradientes de densidad y del viento y por otro el efecto de la marea astronómica.

Para resolver el efecto del viento y los gradientes baroclínicos se emplea una aproximación mediante un método de penalización y de estabilización con macroelementos que permite desacoplar las ecuaciones del momento de las de la continuidad (Espino, 1994).

Aceptando que las frecuencias de oscilación de la marea son conocidas a priori a partir de la expresión del potencial de marea (Godin, 1991) es posible calcular mediante una descomposición armónica la altura de la superficie libre y la velocidad de la corriente mediante

$$\eta(x, y, t) = \eta_0(x, y) + \frac{1}{2} \sum_{n=-N}^N \eta_m(x, y) \exp(i\omega_n t) \quad [4]$$

$$\vec{u}(x, y, z, t) = \vec{u}_0 + \frac{1}{2} \sum_{n=-N}^N \vec{u}_n(x, y, z) \exp(i\omega_n t) \quad [5]$$

siendo i la unidad imaginaria, ω_n es la frecuencia, (u_o, v_o) las componentes estacionarias de la velocidad y η_o la componente estacionaria de la altura de la superficie libre.

Sustituyendo las expresiones [4] y [5] en las ecuaciones [1], [2] y [3] y aprovechando la siguiente propiedad

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T \exp(i\omega_i \zeta) \exp(i\omega_j \zeta) d\zeta = \delta_{ij} \quad [6]$$

donde las funciones \exp son ortogonales entre sí. Multiplicando las ecuaciones [1], [2] y [3] por la función $\exp(i\omega_k t)$ para un k particular entre $-Ny$ y N (incluyendo $k = 0$) e integrando las ecuaciones entre $-T$ y T . Tras sustituir las expresiones [4] y [5] en las ecuaciones previas, si se hace el límite cuando T tiende a infinito, obtenemos para la componente estacionaria las siguientes expresiones

$$\partial_x[(\eta_o + h)U_o] + \partial_y[(\eta_o + h)V_o] = 0 \quad [7]$$

$$u_o \partial_x u_o - v_o \partial_y u_o - f_{v_o} = -g \frac{\rho_o}{\rho} \partial_x \eta_o - g \frac{1}{\rho} \partial_x \alpha + \partial_x[2K_H(\partial_x u_o)] + \partial_y[K_H(\partial_x v_o + \partial_y u_o)] + \partial_z[K_z(\partial_z u_o)] \quad [8]$$

$$u_o \partial_x v_o + v_o \partial_y u_o + f_{u_o} = -g \frac{\rho_o}{\rho} \partial_y \eta_o - g \frac{1}{\rho} \partial_y \alpha + \partial_x[K_H(\partial_x v_o + \partial_y u_o)] + \partial_y[2K_H(\partial_x v_o)] + \partial_z[K_z(\partial_z v_o)] \quad [9]$$

y, para las transitorias

$$i\omega_k \nabla_k + \nabla_H \cdot [(\eta_o + h)\vec{U}_k + \eta_k \vec{U}_o] = -\frac{1}{2} \sum_{\substack{n,m=-N \\ \omega_n + \omega_m = \omega_k}}^N \nabla_H \cdot (\eta_n \vec{U}_m) \quad [10]$$

$$i\omega_k u_k + \vec{u}_o \cdot \nabla_H u_k + \vec{u}_k \cdot \nabla_H u_o - f_{v_k} + g \frac{\rho_o}{\rho} \partial_x \eta_k - \partial_x[2K_H(\partial_x u_k)] = -\frac{1}{2} \sum_{\substack{n,m=-N \\ \omega_n + \omega_m = \omega_k}}^N \vec{u}_n \cdot \nabla_H u_m \quad [11]$$

$$i\omega_k v_k + \vec{u}_o \cdot \nabla_H v_k + \vec{u}_k \cdot \nabla_H v_o + f_{u_k} + g \frac{\rho_o}{\rho} \partial_y \eta_k - \partial_y[2K_H(\partial_y v_k)] - \partial_x[K_H(\partial_x v_k + \partial_y u_k)] - \partial_z[K_z(\partial_z v_k)] = -\frac{1}{2} \sum_{\substack{n,m=-N \\ \omega_n + \omega_m = \omega_k}}^N \vec{u}_n \cdot \nabla_H v_m \quad [12]$$

$k = -N, \dots, -1, 1, \dots, N.$

AZTI ha elaborado un código específico que permite el ajuste automático de los coeficientes libres que aparecen en la formulación utilizada a fin de ajustar los resultados del modelo a las medidas de campo (González *et al.*, 2001).

El resultado de las simulaciones es un conjunto de valores obtenidos en el dominio estudiado, correspondientes a las velocidades y alturas de la superficie libre asociadas a la componente estacionaria y a cada una de las constituyentes de la marea consideradas. Los campos de velocidades son tridimensionales (dependen de la posición en planta del punto y de la profundidad a la que se halle), mientras que los campos de alturas de superficie libre sólo dependen de las coordenadas del punto en planta.

La función de error se define como la diferencia entre los datos medidos y los resultados obtenidos por el modelo numérico. Esta función de error, que denominaremos Ψ , depende, al menos, de los coeficientes libres de las formulaciones empleadas en el cierre turbulento (K_H y K_z). Además, depende de los datos de partida de la modelación numérica: exactitud de la discretización numérica de las ecuaciones de partida, tamaño del elemento insuficiente para reproducir fenómenos locales, adecuación de las condiciones de contorno, errores en la batimetría y en el contorno costero, etc. Y, por supuesto, intervienen las limitaciones propias de las hipótesis subyacentes en las ecuaciones de partida: hipótesis de distribución hidrostática de presiones, despreciar el efecto de la componente vertical de la velocidad en las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, hipótesis de Boussinesq, etcétera.

En este caso, solamente se considera que la función error $\Psi = \Psi(K_H, K_z)$. De manera que la mejor aproximación posible será aquella que se efectúe con los de valores de K_H y K_z que den lugar a un mínimo de Ψ .

El algoritmo de minimización funcional utilizado consiste en aplicar sucesivamente el método de Brent (Brent, 1973) en una dimensión para cada una de las dos variables implicadas en Ψ .

El método de Brent (o de minimización mediante interpolación inversa parabólica) aparece esquematizado en la figura 1. La curva de trazo continuo representa la curva de error, los puntos señalados con las circunferencias con los números 1, 2 y 3 son tres puntos que nos servirán como semilla inicial del algoritmo. La coordenada x del punto 4 rodeado por la circunferencia es la del mínimo de la parábola que pasa por los puntos 1, 2 y 3, y se calcula evaluando la función de error con la coordenada x del punto 4 (esta coordenada x puede ser cualquiera de los tres parámetros libres del modelo de pro-

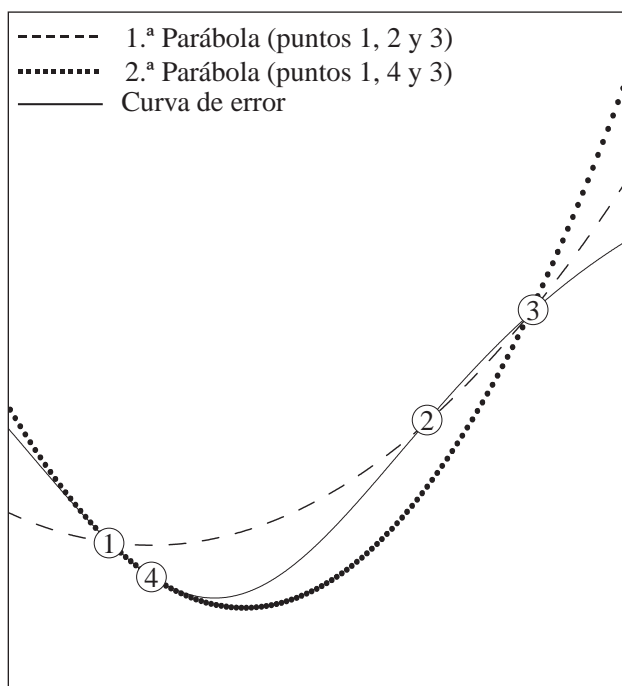


Figura 1. Esquematización del algoritmo de Brent.

pagación de la marea astronómica o de la corriente producida por el viento). El siguiente paso consiste en sustituir el punto 2 por el punto 4 y trazar la parábola que pase por 1, 3 y 4 (que se ha representado por una línea de puntos), calculando la coordenada x del mínimo de esta parábola, y repetir el proceso anterior realizado en el punto 4.

Una vez que el modelo hidrodinámico ha sido utilizado con los datos de viento, alturas de marea, campos de densidades, etc., adecuados y, posteriormente, calibrados los resultados con registros de corrientes de suficiente duración para considerarse representativos, es posible utilizar estos resultados para tratar el estudio de la dispersión de las partículas procedentes de las jaulas de piscicultura. Para ello, se ha elaborado un código en elementos finitos que resuelve la ecuación general de convección - difusión mediante el método de Taylor-Galerkin (Hermosilla, 1996)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_s C) + \frac{\partial}{\partial y}(v_s C) - \frac{\partial}{\partial x}\left(E_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(E_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + SC = 0 \quad [13]$$

donde $C(x, y, z, t)$ es la concentración de partículas, u_s y v_s son las componentes del vector velocidad de la corriente, E_x y E_y son los coeficientes de dispersión horizontal y S representa los términos

fuente (aportación de materia al sistema) y decaimiento (retirada de materia del sistema, por ejemplo, por sedimentación).

La ecuación [13] representa la dispersión de una sustancia producida por el arrastre de la corriente y por la difusión. Los términos decaimiento y fuente pueden representar aportes al sistema o bien materia que se retira del mismo. En este momento de desarrollo del código, únicamente es posible simular procesos en los que el término S sea uniforme a lo largo de la columna de agua como, por ejemplo, es el caso de velocidades de sedimentación de partículas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ajuste entre los modelos numéricos de simulación de la hidrodinámica marina en las aplicaciones realizadas hasta la fecha ha sido bueno. En la figura 2 se muestra un gráfico de comparación entre resultados numéricos obtenidos y medidas de corrientes en la costa de Murcia. En la figura 3 se presentan los resultados de corriente superficial obtenidos por el modelo numérico de simulación en el caso de un viento incidente del Nordeste de 20 km/h en la zona del puerto de Barcelona.

El empleo del modelo de dispersión implementado en Trimodena® permite el estudio de la afección producida a la costa, a los fondos y a la calidad de la columna de agua por los diferentes tipos de sustancias y tamaños de partículas. Asimismo, la posibilidad de utilizar los resultados hidrodinámicos para evaluar la afección al medio en diferentes ubicaciones alternativas con un esfuerzo computacional y económico asumible hace posible su uso como herramienta de gestión y decisión.

Empleando como datos de velocidad de la corriente los resultados de los modelos numéricos (una vez calibrados sus resultados con las medidas de campo) es posible simular la dispersión de los vertidos realizados desde instalaciones de piscicultura. Para ello, se utiliza el modelo de resolución de la ecuación general de convección - difusión mencionado (Hermosilla, 1996).

Uno de los factores más importantes en la dispersión de los desechos de la explotación de piscicultura es el tamaño de las partículas, pues determina la velocidad de sedimentación. El origen de las partículas producidas en la granja de piscicultura son los productos fecales y los restos del alimento. Las esti-

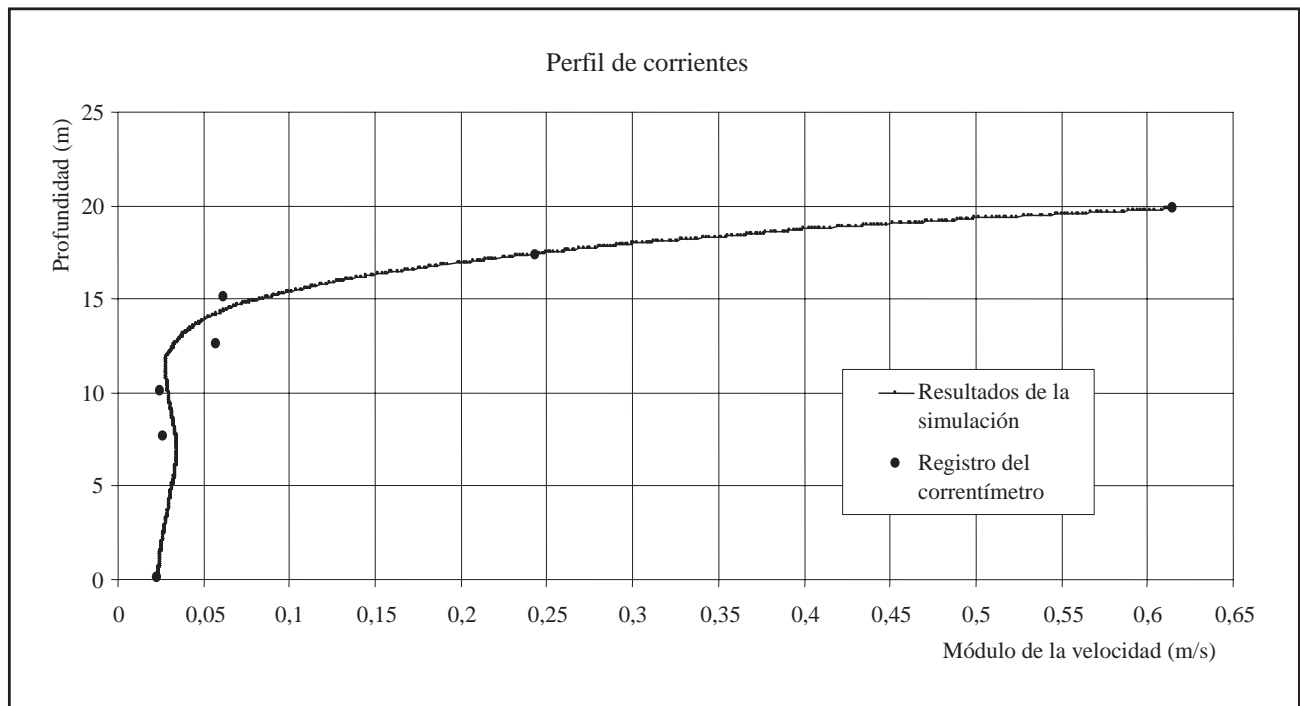


Figura 2. Ajuste entre los resultados numéricos del modelo de simulación Trimodena®, y medidas de un correntímetro situado en la costa de Murcia.

maciones de las velocidades de sedimentación para uno y otro son del orden de 0,06 y 0,15 m/s, respectivamente. Tales velocidades de sedimentación limitan en la práctica la afección al área de sombra de las propias jaulas. Sin embargo, el efecto del vertido sobre el medio marino origina una degradación en las partículas por efecto de la disgregación.

En lo que respecta a las partículas originadas por la disgregación de partículas mayores, las partículas de 31 y 63 mm son las representativas de la de-

gradación de los productos de desecho procedentes de las deyecciones y de los restos de comida. En este caso, las velocidades de sedimentación son $6,0 \times 10^{-4}$ y $2,40 \times 10^{-3}$ m/s respectivamente (Gowen y Bradbury, 1987).

Simulando la dispersión de los vertidos en diferentes condiciones de viento y marea es posible obtener una previsión de cual podría ser la afección en la costa, en la calidad de las aguas y en los fondos. En las figuras 4 y 5 se presentan resultados

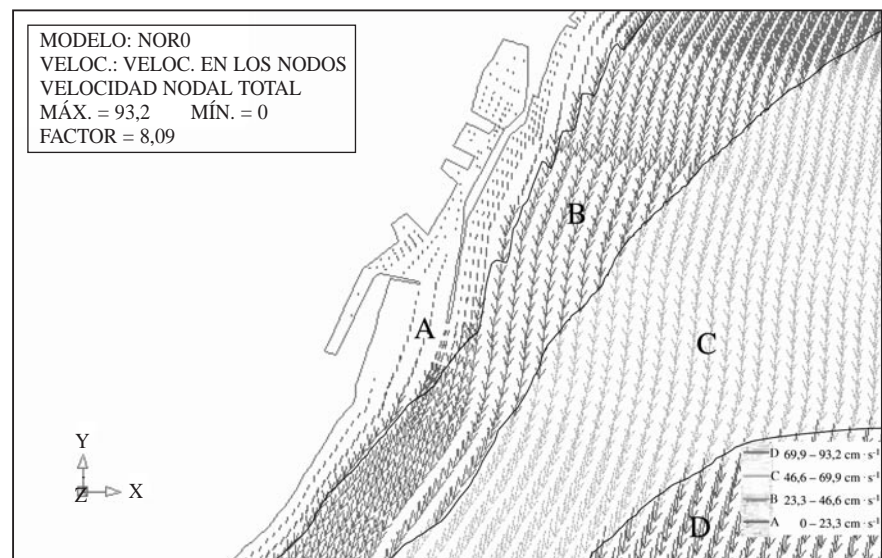


Figura 3. Resultado de la modelización numérica de la corriente producida por un viento del Nordeste de 20 km/h en el área del puerto de Barcelona. En estas condiciones, el registro del correntímetro indica una velocidad de la corriente de 15,7 cm/s mientras que las previsiones del modelo son de 14,8 cm/s.

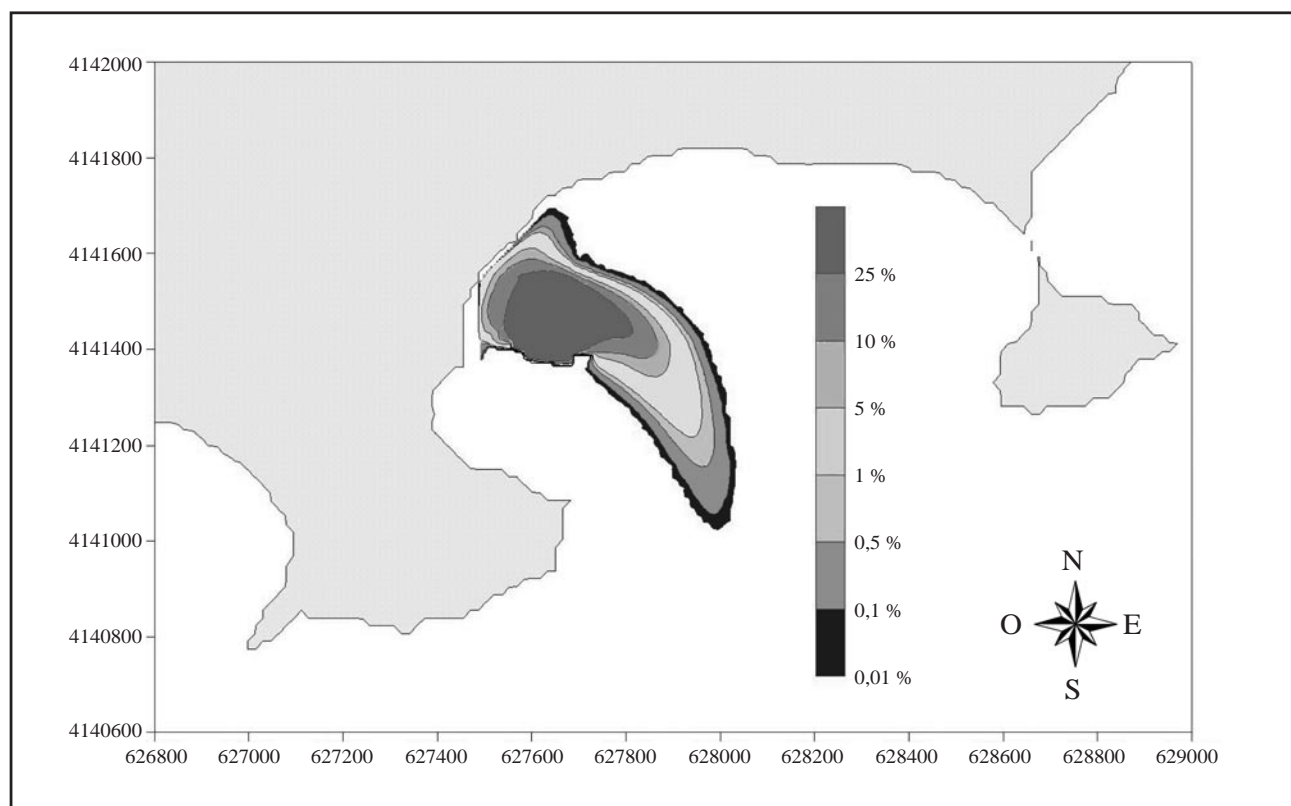


Figura 4. Previsión de grados de afección, en porcentaje, mediante modelado numérico producido por los *pellets* de alimentos originados por una instalación de piscicultura sita en la bahía de El Hornillo (Águilas, Murcia). Concentraciones de partículas en fondo, obtenidas a partir de simulaciones en cuatro escenarios de corrientes diferentes en invierno y ponderadas con la probabilidad de ocurrencia obtenida del análisis estadístico de un registro de corrientes de un mes de duración. El mapa está en el sistema de coordenadas proyectadas UTM con unidades en metros.

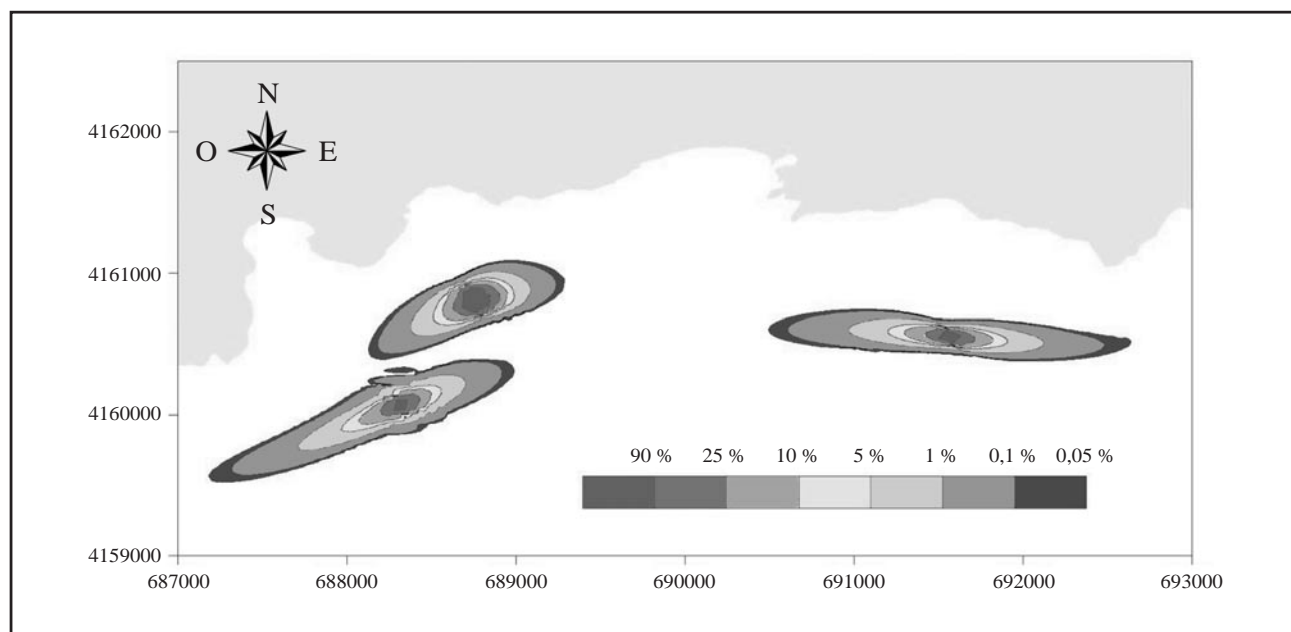


Figura 5. Interacción de efectos entre diversas instalaciones de acuicultura. Previsiones del modelo numérico de simulación en la bahía de Portman (Murcia). Afección sobre el fondo del vertido de partículas de 63 mm procedentes de las jaulas de piscicultura en los dos escenarios de corrientes más frecuentes en situación de invierno. Estos escenarios se han obtenido a partir del análisis de los registros de diversos correntímetros ubicados en la zona de estudio. Mapa representado en el sistema de coordenadas proyectadas UTM con unidades de medida en metros.

del grado de afección que el modelo prevé que se producirá debido a varias instalaciones de piscicultura en la costa levantina española.

CONCLUSIONES

El modelo numérico desarrollado permite reproducir numéricamente la mayor parte de los procesos físicos causantes de la corriente marina. Se ha implementado un algoritmo de calibración automática de los coeficientes libres que aparecen en las formulaciones empleadas, de modo que el ajuste entre los resultados del modelo numérico y las medidas de campo disponibles sea óptimo.

Utilizando como entrada a un modelo en elementos finitos para la resolución de la ecuación de convección - difusión, los resultados validados con las medidas de campo de los modelos hidrodinámicos, es posible analizar diferentes situaciones y emplazamientos de instalaciones de piscicultura en mar abierto. De este modo, es posible analizar diferentes alternativas para su ubicación, con el fin de reducir la posible afección en la calidad de las aguas, en los fondos o en la costa, así como de limitar la interferencia con otros usos u otras instalaciones de piscicultura.

BIBLIOGRAFÍA

- Brent, R. 1973. *Algorithms for Minimization without Derivatives*. Englewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall. Nueva Jersey, EE UU: 195 pp.
- Espino, M. 1994. *Estabilización de la superficie libre en la solución de ecuaciones de Shallow-Water por Elementos Finitos. Aplicaciones oceanográficas*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España: 443 pp.
- Godin, G. 1991. *Tides*. Centro de Investigación y Educación Superior de Ensenada (CICESE). Ensenada, B. C. México: 290 pp.
- González, M. 1994. *Un modelo numérico en Elementos Finitos para la corriente inducida por la marea. Aplicaciones al Estrecho de Gibraltar*. Tesina de especialidad. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España: 244 pp.
- González, M., J. Mader, P. Gyssels, A. Uriarte, S. Sorhouet. 2001. Estudio numérico de propagación de la marea astronómica en el Golfo de Vizcaya. En: *VI Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*. (17-18 de mayo, 2001. Palma de Mallorca, España): 97-98. Fundación para el fomento de la ingeniería del agua. Palma de Mallorca, España: 240 pp.
- Gowen, J. R. y N. B. Bradbury. 1987. The ecological impact of salmonid farming in coastal waters: a review. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 25: 563-575.
- Hermosilla, F. 1996. *Estudio de la dispersión de contaminantes en el mar mediante el M. E. F*. Tesina de especialidad. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España: 236 pp.